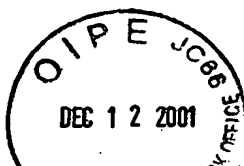


⑪



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM



⑪ CH 665 046 A5

⑤ Int. Cl.: G 21 C 7/10

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

- ⑮ Gesuchsnummer: 4862/84
- ⑰ Anmeldungsdatum: 10.10.1984
- ⑲ Priorität(en): 12.10.1983 SE 8305606
- ⑳ Patent erteilt: 15.04.1988
- ㉔ Patentschrift veröffentlicht: 15.04.1988

㉗ Inhaber:
Aktiebolaget ASEA-Atom, Västerås (SE)

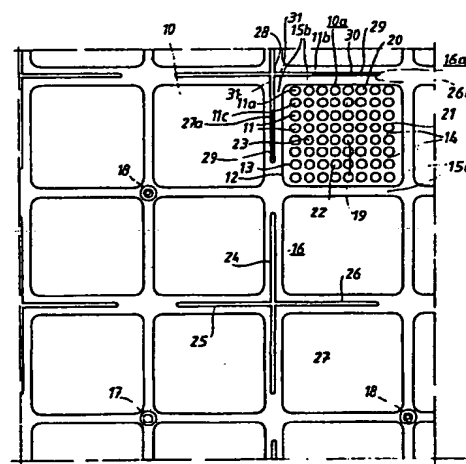
RECEIVED
DEC 14 2001
GROUP 3600

㉚ Erfinder:
Helmersson, Sture, Kolbäck (SE)

㉜ Vertreter:
Patentanwälte Schaad, Balass, Sandmeier, Alder,
Zürich

⑤④ Steuerstab und Brennelementbündel für einen Kernreaktor.

⑤⑦ Ein Steuerstab (16a) weist im Querschnitt ein rechtwinkliges Kreuz bildende Absorberblätter (26a, 27a) auf, die ein Absorbermaterial (29) enthalten und von denen zwei im Querschnitt rechtwinklig zueinander angeordnete Blätter (26a, 27a) sich in Längsrichtung an zwei Seiten des mehrere Brennstäbe (11) enthaltenden Brennelementbündels (10a) erstrecken. Der dem Zentrum (28) der kreuzförmigen Anordnung benachbarte innere Bereich (31) der Absorberblätter (26a, 27a) weist eine kleinere Menge Absorbermaterial als der vom Zentrum (28) weiter entfernt liegende äussere Bereich (30) oder gar kein Absorbermaterial auf. Die inneren Bereiche (31) liegen den der Längsachse (28) benachbarten Brennstäben (11a, 11b; 11a, 11c) vollständig gegenüber. Eine solche Anordnung des Absorbermaterials (29) ermöglicht eine erheblich grössere Zykluslänge beim Betrieb des Kernreaktors.



PATENTANSPRÜCHE

1. Steuerstab und Brennelementbündel für einen Kernreaktor, wobei der Steuerstab (16a) im Querschnitt ein rechtwinkliges Kreuz bildende Absorberblätter (26a, 27a) aufweist, die ein Absorbermaterial (29) für Neutronen enthalten und von denen zwei im Querschnitt rechtwinklig zueinander angeordnete Blätter (26a, 27a) sich in Längsrichtung an zwei Seiten des mehrere Brennstäbe (11) enthaltenden Brennelementbündels (10a) erstrecken, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Absorberblatt (26a, 27a) in einem inneren Bereich (31), der mindestens einem, der Längsachse (28) des Steuerstabes (16a) am nächsten liegenden Brennstab (11a, 11b, 11c) vollständig gegenüberliegt, mindestens eine kleinere Menge Absorbermaterial aufweist als in einem von der genannten Längsachse weiter entfernt liegenden äusseren Bereich (30).

2. Steuerstab und Brennelementbündel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der innere Bereich (31) kein Absorbermaterial enthält.

3. Steuerstab und Brennelementbündel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der innere Bereich (31) Löcher oder Aussparungen (38) aufweist.

4. Steuerstab und Brennelementbündel nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass sich der innere Bereich (31) in radialer Richtung über mindestens zwei Brennstäbe (11a, 11b; 11a, 11c) erstreckt.

5. Steuerstab und Brennelementbündel nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass sich der innere Bereich (31) in radialer Richtung über höchstens drei Brennstäbe erstreckt.

6. Steuerstab und Brennelementbündel nach einem der Ansprüche 1 bis 5 für einen Siedewasserreaktor mit Urandioxid als Brennstoff, dadurch gekennzeichnet, dass die mittlere Anreicherung an spaltbarem Material in frischem Brennstoff in dem Brennelementbündel beim Start eines Zyklus nach der Brennstofferneuerung bei mindestens 3,2% des Anfangsgewichtes Uran im Urandioxid liegt.

7. Steuerstab und Brennelementbündel nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die mittlere Anreicherung an spaltbarem Material in frischem Brennstoff in dem Brennelementbündel beim Start eines Zyklus nach der Brennstofferneuerung bei mindestens 3,4% des Anfangsgewichtes Uran im Urandioxid liegt.

BESCHREIBUNG

Die Erfindung bezieht sich auf einen Steuerstab und Brennelementbündel nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Ein Kern in einem Kernreaktor enthält normalerweise mehrere hundert Brennelementbündel. Jedes Brennelementbündel besteht aus mehreren Brennstäben. In Siedewasserreaktoren werden somit oft Brennelementbündel verwendet, die 6×6 bis 9×9, in der Regel jedoch 8×8 Brennstäbe enthalten. Jeder Brennstab enthält eine grosse Anzahl Brennstofftabletten, die in einer Brennstoffhülle, die normalerweise aus einer Zirkoniumlegierung mit dem Handelsnamen Zirkaloy besteht, aufeinander gestapelt sind. Das Brennelementbündel ist in einem Siedewasserreaktor von einem, normalerweise aus Zirkaloy bestehenden Brennstoffkanal umschlossen. Neben jedem Brennelementbündel ist in der Regel ein Steuerstab einführbar. Die Steuerstäbe in verschiedenen Positionen sind während des Betriebes des Reaktors auf unterschiedlichen Niveaus in den Kern eingeführt. Eine Ausführungsart bekannter Steuerstäbe weist im Querschnitt in einem rechtwinkligen Kreuz zueinander angeordnete Absorberblätter auf.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Steuerstab und Brennelementbündel zu schaffen, bei denen die Zykluslän-

ge, nämlich die Zeit zwischen zwei Brennstofferneuerungen, die in der Regel als entnommene spezifische Energie MWd/tU angegeben wird, für einen Reaktor erheblich verlängert werden kann.

Die gestellte Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Eine solche Lösung gilt insbesondere für Steuerstäbe, die während der ganzen Betriebsperiode des Reaktors neben den Brennelementbündeln stillstehen. Es ist möglich, eine genügende Menge an neuem Brennstoff mit ausreichender Anreicherung an spaltbarem Material während einer längeren Betriebsperiode anzuwenden, ohne dass ein zu hoher interner Leistungsformfaktor (der Quotient des maximalen örtlichen Wertes der Leistung und ihres Durchschnittswertes in einem horizontalen Schnitt durch das Brennelementbündel) mit einer damit verbundenen Gefahr für Schäden an den Brennstäben auftritt, wenn die Steuerstäbe am Ende der Betriebsperiode aus dem Kern herausgezogen werden. Der Grund für das günstige Ergebnis besteht darin, dass die der im Zentrum der kreuzförmigen Anordnung verlaufenden Längsachse unmittelbar benachbarten Brennstäbe nicht gegen einen Abbrand an spaltbarem Material geschützt werden, wie es bei der Anwendung konventioneller Steuerstäbe mit sich kreuzenden Blättern und gleichmässig auf nahezu die ganze Breite der Blätter verteiltem Absorbermaterial der Fall ist, sondern derart ausgeführt werden, dass sie am Ende der Betriebsperiode einen niedrigeren Gehalt an spaltbarem Material aufweisen.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform nach Anspruch 2 enthalten die inneren Bereiche der Absorberblätter nicht nur eine kleinere Menge, sondern kein Absorbermaterial.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform nach Anspruch 3 sind die Löcher oder Aussparungen mit Wasser gefüllt. Dadurch wird die Konsumtion von spaltbarem Material in den benachbarten Brennstäben noch besser aufrechterhalten, wodurch ein niedrigerer interner Leistungsformfaktor erzielt wird, wenn die Brennstäbe am Ende einer Betriebsperiode aus dem Kern herausgezogen werden.

Um den Kernreaktor mit längeren Zyklen betreiben zu können, kann der Einsatz an spaltbarem Material beim Start jedes Zyklus wesentlich erhöht werden. Dies wird dadurch erreicht, dass die Anreicherung des frischen Brennstoffes erhöht wird, und/oder dadurch, dass der Anteil an ausgetauschtem Brennstoff erhöht wird. Unter «längeren Zyklen» wird eine Energieentnahme von mehr als 10 000 MWd/tU verstanden, was ungefähr einer Betriebszeit von eineinhalb Jahren für Kernreaktoren mit einer normalen Leistungsdichte entspricht.

Die bevorzugten Ausführungsformen nach den Ansprüchen 6 und 7 beziehen sich auf einen Siedewasserreaktor mit Urandioxid als Brennstoff. Das spaltbare Material kann dabei U 235 oder Pu 239 und Pu 241 sein. Die Menge des frischen Brennstoffes im Kernreaktor sollte mindestens 30%, vorzugsweise jedoch mindestens 35% der Menge des gesamten Brennstoffes beim Start eines Zyklus betragen.

Bezogen auf die Ansprüche 4 und 5 sollte sich der innere Bereich radial über höchstens die Hälfte der Brennstäbe einer Seite erstrecken.

Anhand der Zeichnungen wird nachfolgend ein Ausführungsbeispiel näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 einen horizontalen Schnitt eines Reaktorkerns für einen leichtwassermoderierten Siedewasserreaktor,

Fig. 2 einen Steuerstab in einer Seitenansicht, teilweise im Schnitt,

Fig. 3 ein Schema eines Brennelementbündels in einem bestimmten Abbrandstadium mit den Angaben des Gehaltes an spaltbarem Material, bestehend aus U 235 sowie der Gesamtmenge Pu 239 und Pu 241 für jeden Brennstab und

Fig. 4 ein Schema des selben Brennelementbündels gemäss

Fig. 3, jedoch nach weiteren 12 000 MWd/tU, was einer Betriebszeit von etwa zwei Jahren entspricht, in Verbindung mit einem Steuerstab.

Der in der Fig. 1 dargestellte horizontale Schnitt eines Reaktorkerns für einen Siedewasserreaktor mit vertikalen Brennelementbündeln betrifft nur einen kleinen Teil des Reaktorkerns. Der dargestellte Schnitt enthält neun ganze Brennelementbündel 10. Die gesamte Anzahl der Brennelementbündel beträgt mehrere hundert. Jedes der Brennelementbündel ist wie das Brennelementbündel 10a ausgeführt. Dieses Bündel 10a enthält in einem im Querschnitt quadratischen Gitter angeordnete vierundsechzig Brennstäbe 11. Das Brennelementbündel ist in einem Brennstoffkanal 12 aus Zirkaloy 4 mit quadratischem Querschnitt eingeschlossen. Die Stäbe werden mit nicht gezeigten Abstandshaltern in ihren Lagen gehalten, die in gleicher Teilung zwischen ebenfalls nicht gezeigten oberen und unteren Gitterplatten auf dem Brennelementbündel platziert sind. Jeder Brennstab besteht aus mehreren zirkularzylindrischen Tabletten aus Uran-dioxid als Brennstoff, die aufeinander gestapelt und in einer Brennstoffhülle 13 aus Zirkaloy 2 eingekapselt sind. Die Räume 14 zwischen den Brennstäben in dem Brennstoffkanal werden von einem Kühlmedium durchströmt, das im vorliegenden Fall leichtes Wasser ist. Die Spalte 15a und 15b zwischen den Brennelementbündeln werden auch von Kühlmedium derselben Art durchströmt. Die Spalte 15b, in welche Steuerstäbe 16 eingeführt werden, sind breiter als die Spalte 15a, in denen keine Steuerstäbe eingesetzt sind.

Der Querschnitt zeigt auch Neutronenquellen 17 sowie Neutronendetektoren 18. Einer oder mehrere der Brennstäbe kann/können gegen einen nicht energieproduzierenden Stab ausgetauscht sein. Somit könnte z.B. der Stab 19 gegen einen massiven oder wassergefüllten Stab aus Zirkaloy 2 ausgetauscht sein. Die Brennstäbe 20, 21, 22 und 23 sind tragende Brennstäbe, die an den oberen und unteren Gitterplatten im Brennelementbündel verankert sind. Die Steuerstäbe 16 haben Absorberblätter 24, 25, 26 und 27, die ein rechtwinkliges Kreuz bilden. Das Zentrum des Steuerstabskreuzes ist mit 28 bezeichnet. Das Absorberblatt enthält Absorbermaterial 29 in einem äusseren Bereich 30 des Blattes, jedoch nicht im inneren Bereich 31, der den am dichtesten am Zentrum 28 des Kreuzes liegenden Brennstäben 11a und 11b bzw. 11a und 11c vollständig gegenüberliegt.

Der in Fig. 2 gezeigte Steuerstab ist im wesentlichen aus rostfreiem Stahl hergestellt und besteht aus einem Absorberteil 32, der von einer vertikalen Kupplungsstange 33 getragen wird. Der Absorberteil besteht aus vier Absorberblättern 24 - 27 (Fig. 1), von denen zwei, 25 und 26, in der Fig. 2 zu sehen sind. Die Blätter sind an ihrem äusseren Bereich 30 mit einer grossen Anzahl gebohrter Kanäle 34 versehen, die sich rechtwinklig zur Längsrichtung des Stabes erstrecken. Die Kanäle sind mit dem Absorbermaterial 29, z.B. mit pulverförmigem Borkarbid und/oder metallischem Hafnium gefüllt und nach aussen durch Schweißen hermetisch verschlossen. Der Bereich 31 jedes Absorberblattes, der innerhalb der gefüllten Kanäle liegt, enthält kein Absorbermaterial. Es ist jedoch möglich, Absorbermaterial in einer kleineren Menge im Bereich 31 als im Bereich 30, z.B. in feineren Kanälen anzuordnen. Zur Steuerung des Steuerstabs in den relativ schmalen Spalten zwischen den Brennelementbündeln ist dieser oben mit Steuerkissen 35 versehen. Ausserdem weist er einen Handgriff 36 zur Handtierung des Stabes beim Einmontieren und Austausch auf. Unten ist der Stab mit einem Kuppelkopf 37 versehen, durch welchen er mit einer Antriebsvorrichtung verbunden werden kann.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist der Steuerstab mit Aussparungen 38 versehen, die sich über den am dichtesten am Zentrum des Kreuzes liegenden Brennstab erstrecken. Die Aussparungen werden mit Wasser gefüllt, so dass die Kon-

sumtion an spaltbarem Material in naheliegenden Brennstäben während des Betriebs des Reaktors grösser wird.

Bei der reaktorphysikalischen Dimensionierung wird auf die Wirkung des zusätzlichen Wassers in den Spalten zwischen den Brennelementbündeln Rücksicht genommen, was für die örtliche Variation im Neutronenfluss von grosser Bedeutung ist. Dieses Wasser bewirkt einen örtlich erhöhten Neutronenfluss, so dass die an Wasserspalten angrenzenden Brennstäbe stärker als andere Brennstäbe belastet werden. Um die Leistungsverteilung im Brennelementbündel so weit wie möglich auszugleichen, werden Brennstäbe mit unterschiedlicher Anreicherung an spaltbarem Material, das im vorliegenden Fall zu Beginn nur aus U 235 besteht, in den einzelnen Positionen im Brennelementbündel verwendet. Dieser Anreicherungsunterschied wird während des Betriebs beibehalten, ausser wenn ein Steuerstab lange Zeit neben dem Brennelementbündel eingesetzt war, wobei das spaltbare Material in den angrenzenden Stäben gegen einen Abbrand geschützt wird. Gleichzeitig wird die Neubildung von spaltbarem Material aus dem brütbaren Material nicht in demselben Masse verhindert. Dies würde zu einer allmählichen Akkumulation von spaltbarem Material führen, was unzulässige Belastungen mit sich bringt, wenn der Steuerstab schliesslich herausgezogen wird. Dadurch, dass das Absorbermaterial dem Zentrum des Kreuzes benachbart weggelassen wird und dadurch, dass vorzugsweise mehr Wasser zugeführt wird, dass die Moderation verstärkt, kann die Konsumtion von spaltbarem Material auf einem genügend hohen Niveau gehalten werden, so dass die Akkumulation von spaltbarem Material effektiv begrenzt wird.

Bei einem Abbrand in einem Intervall von 14 000 - 30 000 MWd/tU wird oft ein Steuerstab neben dem Brennelementbündel platziert. Fig. 3 zeigt ein Beispiel für ein Brennelementbündel 10a in diesem Abbrandintervall, genauer gesagt, bei dem Abbrand 30 000 MWd/tU. Die Anteile an spaltbarem Material werden hier für die einzelnen Brennstäbe ausgedrückt in Prozent des Anfangsgewichts Uran im Brennstoff (Urandioxid) angegeben. (Die in der Anmeldung im übrigen angegebenen % sind auch Prozent des Anfangsgewichtes Uran im Brennstoff.) Zur Verdeutlichung sind nicht die Brennstäbe selbst, sondern nur deren Anreicherungsgehalt dargestellt. Die oberen Zahlen 39 in jedem Feld geben den Anreicherungsgehalt U 235 in % und die unteren Zahlen 40 geben den gesamten Anreicherungsgehalt von Pu 239 und Pu 241 in % für jeden Brennstab im Brennelementbündel an. Das Plutonium ist während des Betriebs durch das Einfangen schneller Neutronen in U 238 gebildet worden.

Der früher genannte höhere Neutronenfluss und die damit verbundene höhere Leistung in den Stäben an den Wasserspalten 15a und 15b hat bewirkt, dass das spaltbare Material, im wesentlichen U 235, Pu 239 und Pu 241, hier schneller als in den zentralen Teilen des Brennelementbündels konsumiert wird. Dies hat mit der Zeit die anfangs durchgeführte Anreicherungsverteilung verstärkt, und die Leistung im Brennelementbündel ist ausgeglichen worden. Der mittlere Gehalt an U 235, der anfangs bei 3,4% gelegen hat, liegt nach 30 000 MWd/tU im Abbrand, was einer Betriebszeit von ca. 5 Jahren entspricht, bei 1,8%, und der mittlere Gehalt der gesamten Menge Pu 239 (0,46%) und Pu 241 (0,07%) bei 0,53%. Die Spaltung eines U 235-Kernes und eines Pu-Kernes ergibt ungefähr denselben Energiegewinn. Die Menge spaltbaren Materials ist also auf ungefähr die Hälfte der anfänglichen Menge in diesem Beispiel reduziert worden. Das zurückgebliebene spaltbare Material ist auch auf eine andere Weise auf die zu den Brennelementbündeln gehörenden Brennstäbe verteilt.

Fig. 4 zeigt dasselbe Brennelementbündel nach weiteren 12 000 MWd/tU im Abbrand, was ca. 2 Betriebsjahren entspricht, während welcher Zeit der Steuerstab 16a in den Kern eingesetzt war. Der mittlere Gehalt an U 235 ist nun noch

mehr, auf 0,68% reduziert worden, und der mittlere Gehalt der gesamten Menge Pu 239 (0,61%) und Pu 241 (0,14%) ist etwas, auf 0,75%, angestiegen. Besonders wichtig in diesem Zusammenhang ist der begrenzte Aufbau von Pu in den Eckstäben 11a, 11b und 11c. Wenn der Steuerstab 16a aus dem Kern herausgezogen wird, wird der interne Leistungsformfaktor 1,25.

Wenn der Steuerstab 16a statt dessen mit Kanälen 34 versehen gewesen wäre, die sich bis zum Zentrum des Kreuzes hin

ausdehnen, und wenn diese Kanäle mit Absorbermaterial gefüllt gewesen wären, so hätten die Brennstäbe 11a, 11b und 11c nach diesen weiteren 12 000 MWd/tU einen Anreicherungsgehalt an U 234 von 0,12%, bzw. 0,24%, bzw. 0,24% und einen gesamten Anreicherungsgehalt an Pu 239 und Pu 241 von 0,85%, bzw. 0,83%, bzw. 0,83% gehabt. Dies hätte einen internen Leistungsformfaktor von 1,60 ergeben, wenn der Steuerstab aus dem Kern herausgezogen wird.

FIG. 1

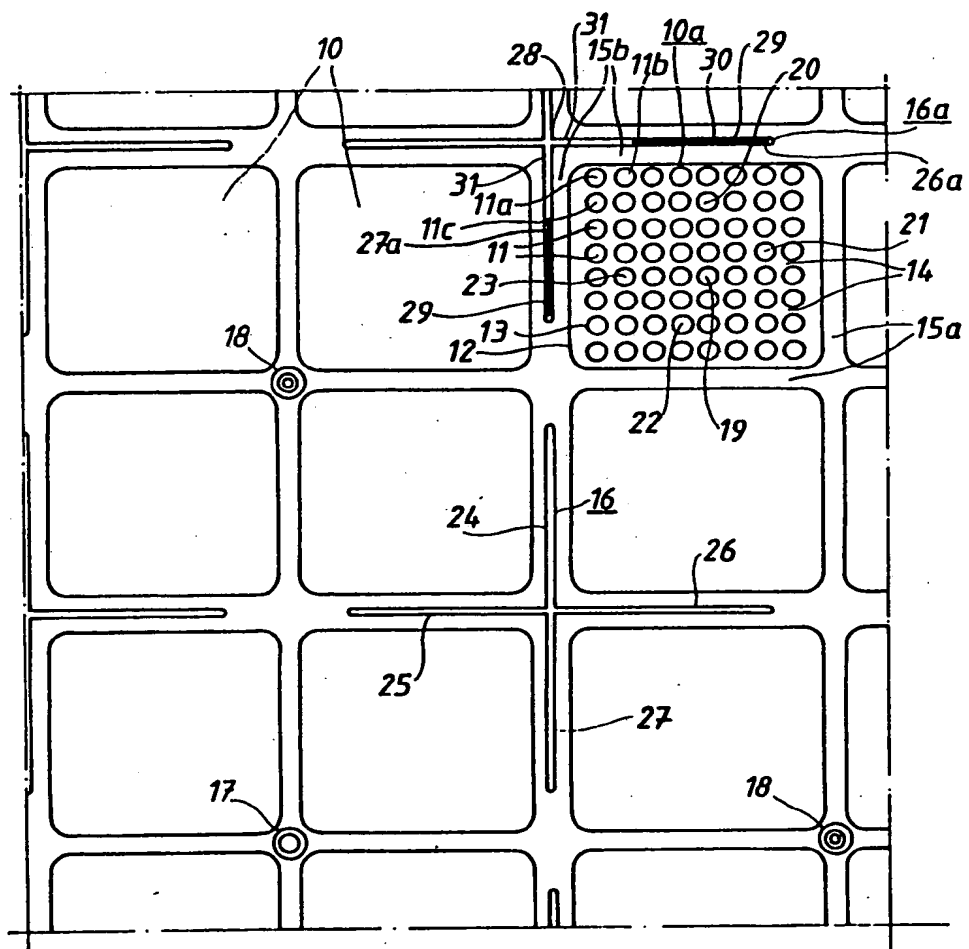


FIG. 2

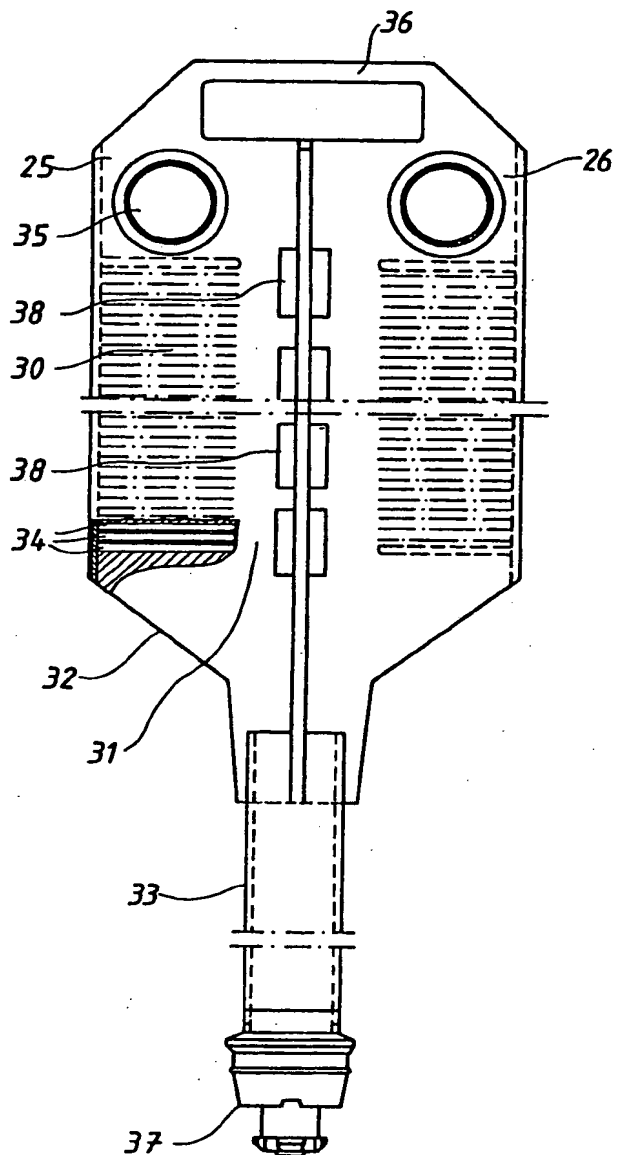


FIG. 3

11a 11b 11c 39 40

0,17	0,37	0,47	0,68	0,71	0,69	0,62	0,39
0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,49	0,48	0,47
0,37	0,69	0,85	1,33	1,37	1,33	1,23	0,73
0,44	0,45	0,49	0,52	0,53	0,53	0,52	0,51
0,47	0,85	1,41	1,54	1,58	1,57	1,50	1,24
0,46	0,49	0,53	0,55	0,56	0,57	0,56	0,55
0,68	1,33	1,54	1,63	1,63	1,65	1,59	1,36
0,48	0,52	0,55	0,58	0,61	0,59	0,58	0,58
0,71	1,37	1,58	1,63	0	1,65	1,62	1,40
0,49	0,53	0,56	0,61	0	0,62	0,59	0,59
0,69	1,33	1,57	1,65	1,65	1,66	1,60	1,37
0,49	0,53	0,57	0,59	0,62	0,60	0,58	0,58
0,62	1,23	1,50	1,59	1,62	1,60	1,52	0,92
0,48	0,52	0,56	0,58	0,59	0,58	0,57	0,57
0,39	0,73	1,24	1,36	1,40	1,37	0,92	0,78
0,47	0,51	0,55	0,58	0,59	0,58	0,57	0,56

FIG. 4

16a 28 31 30 29 39 40

0,07	0,17	0,25	0,41	0,45	0,42	0,34	0,17
0,60	0,64	0,70	0,77	0,81	0,79	0,74	0,66
0,17	0,36	0,50	0,83	0,88	0,83	0,70	0,35
0,64	0,66	0,72	0,79	0,80	0,79	0,73	0,69
0,25	0,50	0,88	0,99	1,02	0,98	0,87	0,62
0,70	0,72	0,78	0,81	0,82	0,80	0,76	0,71
0,41	0,83	0,99	1,04	1,02	1,01	0,92	0,69
0,77	0,79	0,81	0,82	0,85	0,80	0,77	0,73
0,45	0,88	1,02	1,02	0	0,97	0,92	0,70
0,81	0,80	0,82	0,85	0	0,83	0,76	0,73
0,42	0,83	0,98	1,01	0,97	0,96	0,87	0,64
0,79	0,79	0,80	0,80	0,83	0,78	0,74	0,70
0,34	0,70	0,87	0,92	0,92	0,87	0,76	0,39
0,74	0,73	0,76	0,77	0,76	0,74	0,70	0,67
0,17	0,35	0,62	0,69	0,70	0,64	0,39	0,28
0,66	0,69	0,71	0,73	0,73	0,70	0,67	0,64

THIS PAGE BLANK (USPTO)